

# 大型双基座平面扫描架结构力学特性研究

王业文<sup>1</sup> 黄凯旋<sup>1</sup> 白杨<sup>2</sup> 王盼盼<sup>2</sup>

(1 上海航天电子通讯设备研究所 上海 201109; 2 北京环境特性研究所 北京 100089)

**摘要:** 平面扫描架是现代天线暗室测试的重要工具, 扫描架的扫描范围和扫描平面度是关键指标。本文描述一种大型双基座平面扫描架的结构组成, 该扫描架用于目标散射截面积 (RCS) 的测量, 采用单塔双立柱的结构形式。虽然扫描架安装在 23.5m 长的地坑中, 行程却可以达到 22.5m, 同时有效扫描高度可达 13m, 探头离地最低点高度仅 0.7m, 扫描范围内的平面度 (RMS) 能达到 0.2mm。文章对该扫描架的工作方式进行详细论述, 并通过力学仿真, 计算出该扫描架的结构强度和刚度, 通过结果分析出影响扫描架精度的主要因素, 以及扫描架安全性设计是否满足要求。

**关键词:** 双基座扫描架; 力学仿真; 安全性

## 0 引言

近场测量是当前天线测量技术中常用的方法。它是根据天线的参数, 利用特定的探头, 在被测天线口面做扫描运动, 从而得到天线口面的幅度、相位分布, 再将近场数据转换成远场数据。近场测量是目前国际上广泛采用的一种高精度天线测量技术<sup>[1]</sup>。

天线近场测量具有测量精度高、抗干扰能力强、工作效率高等优点, 广泛用于相控阵天线测量, 以及目标散射截面积 (RCS) 测量<sup>[2]</sup>。

在所有近场测量系统中, 平面扫描测量系统占据主导地位<sup>[3]</sup>, 平面扫描架从 20 世纪 80 年代发展起来, 主要用于平面近场的天线测量系统。

本文主要研究一种大型双基座平面扫描架, 对其结构组成和工作方式进行详细论述, 针对扫描架的主体进行了静力仿真和模态仿真<sup>[4]</sup>, 分析出该扫描架的结构刚度和强度, 以及影响扫描架精度的主要因素。通过扫描架安全性设计计算仿真, 分析扫描架安全性是否满足要求。

## 1 平面扫描架结构设计

### 1.1 结构设计需求

平面扫描架的功能是利用高精度的直线导轨和伺服电动机驱动运动平台, 运动平台上的测试探头在垂直平面内  $X$ 、 $Y$  方向进行二维运动, 同时实现探头的前后伸缩和旋转的二维运动。大型扫描架一般采用塔式结构, 主要由水平基座 ( $X$  轴)、垂直塔架 ( $Y$  轴)

和探头箱 ( $Z$  轴) 三部分组成。 $X$  轴、 $Y$  轴的末级传动一般采用齿轮齿条传动,  $Z$  轴的前后移动则是通过滚珠丝杠副传动实现的, 极化轴为手动形式的 360° 精密转台<sup>[5,6]</sup>。

本文中的平面扫描架架设在暗室早期基建时预留的地坑内, 同时为了满足暗室行车要求, 水平基座须全部沉入地坑内。地坑长度 23.5m, 但要求平面扫描架有效的扫描范围覆盖  $X$  轴 22.5m, 由于  $Y$  轴的自身结构尺寸, 不可避免占用地基长度方向约 3.65m 的空间。按照传统设计, 扫描架的有效行程将被限制在 19.25m 以内, 传统单探头的设计方案无法满足覆盖  $X$  轴方向 22.5m 的设计要求。因此该扫描架采用单塔双立柱的结构形式, 即在传统的  $Y$  塔单导轨设计的基础上, 采用了  $Y$  塔两侧布置双  $Y$  轴导轨的设计思路。通过左右两侧的  $Y$  轴布局设计, 扩展了探头在  $X$  方向的扫描范围, 在有限的地基长度的情况下, 整个扫描架在宽度方向上有效的扫描区域扩展到 22.5m。

### 1.2 结构设计布局

扫描架系统的水平基座 ( $X$  轴) 行程为 22.5m, 垂直塔架 ( $Y$  轴) 双立柱行程同为 13m, 两个探头箱 ( $Z$  轴) 行程同为 0.25m。结合单塔双立柱平面近场扫描架系统具体需求, 单塔双立柱平面近场扫描架系统采用“立柱辅以背架支撑的双立柱结构+轻型铸件水平基座”的方案, 具体结构外形见图 1。

### 1.3 详细设计

单塔双立柱平面近场扫描架系统主要由水平基座

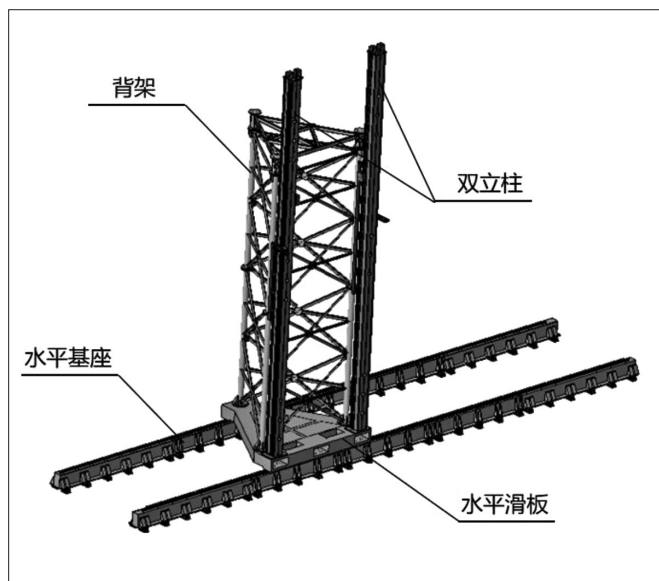


图1 双立柱平面近场扫描架结构外形

( $X$ 轴)、垂直塔架( $Y_1$ 轴、 $Y_2$ 轴)、探头箱 $Z$ 向机构( $Z_1$ 轴、 $Z_2$ 轴)及极化轴( $P_1$ 轴及 $P_2$ 轴)几个部分组成。单塔双立柱平面近场扫描架 $X$ 轴、 $Y_1$ 轴、 $Y_2$ 轴、 $Z_1$ 轴、 $Z_2$ 轴、 $P_1$ 轴、 $P_2$ 轴分别由电动机驱动,测试探头可分别在双立柱平面近场扫描架的 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三个方向上实现移动和精确定位,在极化轴( $P$ 轴)上可实现转动和精确定位。该单塔双立柱平面近场扫描架可以看成由二个独立平面近场扫描架组成。

### 1.3.1 水平基座( $X$ 轴)

为规避风险,提高装配效率,水平基座采用薄壁箱型铸造结构形式方案。方案扬铸件结构特性之长,避焊接结构特性之短,利用国内已成熟的超长导轨一次加工的工艺,既节省调整时间,又可获得优良的精度保证。

分体式基座结构可以满足不高出地面即上部通行车辆的需求。地坑净长度为22.9m,根据系统行程要求,采用5根基座组合拼接的形式,每根4.56m,基座总长为22.8m,左右两侧相同,共需10根。

每一根基座的导轨安装面通过磨床进行一次加工,可实现直线度小于0.06mm的目标,安装时通过垫铁调整每一根基座的位置,可保证整体拼接后的直线度。

水平滑板设计成中空式结构,两端固定在水平导轨的滑块上。水平滑板铸造成型,材质为ZG340,质量约9.5t。

基座与地基之间采用调整垫铁的形式进行连接,通过化学螺栓进行固定。

### 1.3.2 垂直塔架( $Y$ 轴)

垂直塔架( $Y$ 轴)选用“双立柱+轻型背架”结构方案,垂直塔架整体质量约15t,导轨及传动系统均安装在前方立柱上,因此所有加工面的精度均依靠立柱自身加工。由于立柱为整体方管焊接的细长结构,刚度有限,因此在后方安装轻型背架,为立柱提供支撑点,背架采用分段式焊接结构,背架本身对精度要求不高。双立柱分别安装在背架上,相隔距离为2.5m,可独立运行,互不影响。

立柱是垂直塔架的核心部件,其决定了垂向和 $Z$ 轴乃至 $P$ 轴的精度。因 $Y$ 轴方向行程要求为13m,立柱长度则需要约14m,考虑到加工运输等因素,立柱截面不能过大。因此立柱采用整根方钢管焊接形式,截面尺寸约为500mm×600mm×16mm,另焊接多条安装导轨用的座块,可以保证足够的比刚度。立柱上端法兰用于安装滑轮组件,下端与水平滑板连接,中间与塔架连接,单根立柱总质量约4t。立柱安装时需要调节安装接口,保证立柱的垂直度。

### 1.3.3 探头箱( $Z$ 轴)

$Z$ 轴的移动机构采用一维全封闭式精密滑台,滑台安装在垂直塔架上,探头箱通过一维精密滑台保证测试探头沿垂直塔架平稳移动和精确定位,质量约20kg。

### 1.3.4 极化( $P$ 轴)

极化轴( $P$ 轴)采用高精度转台,安装在 $Z$ 轴探头箱的一维精密滑台上,可实现极化轴360°定位,定位精度 $< 0.05^\circ$ ,内有滚子轴承,可承受大于50kg的载荷,自身质量小于7.9kg,更有法兰接口,可方便安装各频段测试探头。

## 2 仿真分析

### 2.1 静力分析

对扫描架开展静力仿真分析工作,为产品的设计提供充分的理论支撑。

结合扫描架的使用工况,静力分析时施加水平加速度和重力加速度,塔架底部固定约束,赋予钢制材料参数。

塔架静力仿真分析云图如图2所示,最大变形小于0.0445mm,发生在双立柱最上端。

基座静力仿真云图如图3所示,最大变形小于0.029mm,发生在水平滑板的中央。

根据以上静力学仿真分析结果,双立柱扫描架的

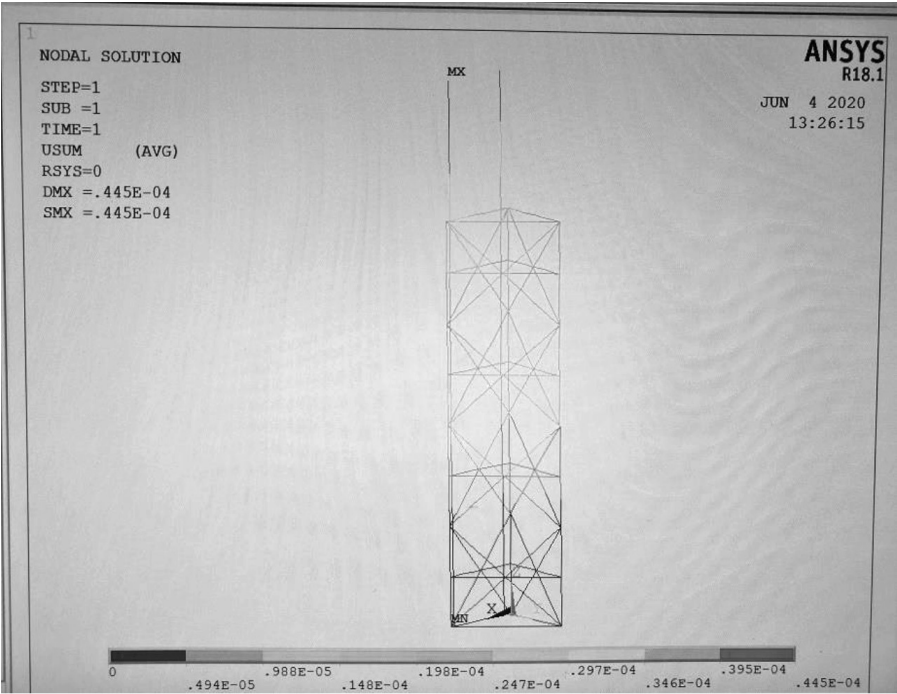


图 2 塔架仿真云图

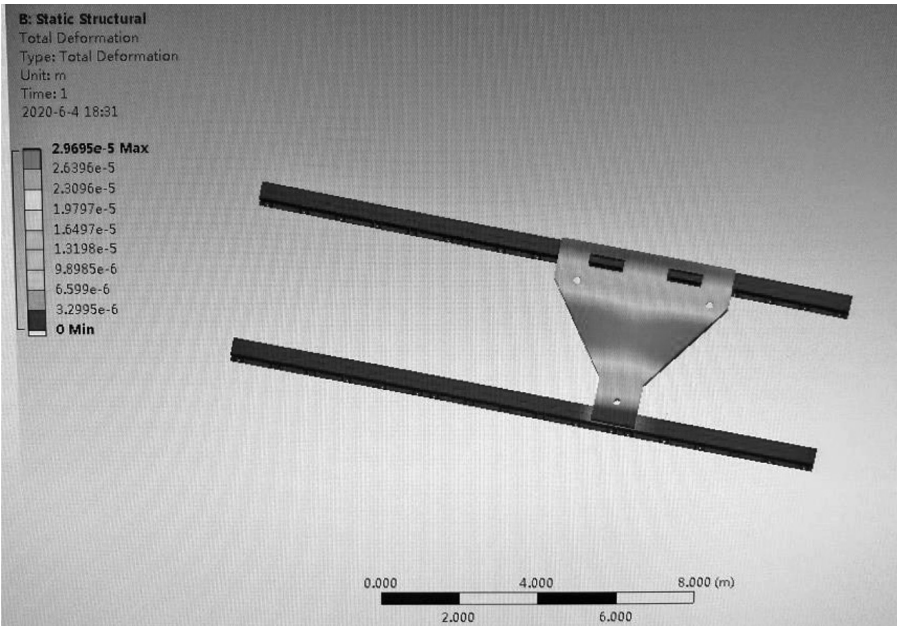


图 3 水平基座整体仿真云图

整体最大变形均小于 0.05mm，对比平面度和定位精度指标，理论上该结构刚度可满足要求。

2.2 模态分析

为了研究扫描架的动力学特性，对扫描架的动态刚度进行分析，提取扫描架前 10 阶模态，频率如表 1 所示。

扫描架的前 4 阶频率都出现在两个立柱上，主要原因是立柱受长度影响，自身刚度相对较低，后 6

阶为背架局部模态。  
从模态分析可知，第 1 阶模态频率为 10.9Hz，根据以往大型扫描架的设计工程经验分析，本扫描架动态刚度可满足要求。  
2.3 单塔双立柱平面近场扫描架危险工况分析

扫描架属大型设备，安全性至关重要。扫描架 X 轴和 Y 轴方向均布置软件、电气、机械三重保护机制。程序中 X 轴和 Y 轴均设置了软件限位，通常情况下运行至软件限位扫描架即停止运行，同时扫描架 X 轴和 Y 轴方向均布置了接触式的限位开关，用以限制 X 轴和 Y 轴的运动极限位置，保护整体结构。滚珠丝杠采用定长限位滚珠丝杠，当滚珠丝杠螺母旋转向前方移动到设计指定位置时，螺母会在该位置空转，没有位移，从而实现 Z 轴方向的限位功能。

扫描架最危险工况为三级限位（软件限位、行程开关限位、机械限位）的前两级失效<sup>[7]</sup>，扫描架以工作速度撞上机械限位，此种特殊工况下要保证扫描架不冲出导轨、结构件不发生破坏。

根据上述分析，首先进行机械限位装置的校核。

本扫描架上的机械限位采用安装缓冲器的形式，缓冲器行程（S）为 100mm。

（1）惯性冲击的校核：运动构件质量  $m=24000\text{kg}$ ，速度  $v=0.25\text{m/s}$ ，

则因为惯性力每次撞击的能量为： $E_k=m \times v^2/2=750\text{（Nm）}$ 。

表 1 模态分析前 10 阶频率

| 序号     | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|--------|------|------|------|------|------|
| 频率 /Hz | 10.9 | 11.1 | 11.2 | 11.5 | 12.6 |
| 序号     | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| 频率 /Hz | 12.7 | 12.9 | 14.1 | 14.3 | 14.4 |

(2) 驱动电动机的校核: 水平电动机驱动功率  $P=5\text{kW}$ , 按水平运动的负荷来计算, 则撞击时电动机工作产生的冲击力为:  $F_D=3000 \times P/v=60000\text{N}$ 。

由于缓冲器缓冲行程  $S=100\text{mm}$ , 因电动机产生的最大撞击能量为  $E_W=F_D \times S=6000\text{Nm}$ 。

(3) 最大撞击能量的计算: 每次撞击的总能量  $E_T=E_K + E_W=6750\text{Nm}$ 。

(4) 最大撞击力的计算: 保留一定安全系数, 取 85% 的安全行程, 最大冲击力  $F_P=E_T/(S \times 0.85) = 79411\text{N}$ 。

选用的缓冲器, 每次最大吸收能量  $7700\text{Nm} > 6750\text{Nm}$ , 最大冲击力  $F_P=111000\text{N} > 79411\text{N}$ 。综上所述, 该机械缓冲器满足危险工况下正常工作需求。

对最大冲击力下扫描架结构件的强度进行校核, 施加加速度  $F_P/m=79411/24000=3.3\text{m/s}^2$  进行仿真计算, 如图 4 所示。

根据仿真云图, 可知最大应力  $72\text{MPa}$ , 发生在立柱与背架连接位置, 但仍小于材料的最低屈服强度极限  $345\text{MPa}$ , 所以结构件不会发生强度破坏。结构件有较大的瞬时变形, 应为弹性变形可恢复, 但可能会对精度产生影响, 所以应及时维护, 避免此类事件发生。

### 3 结语

从静力仿真分析结果可知, 塔架最大变形小于

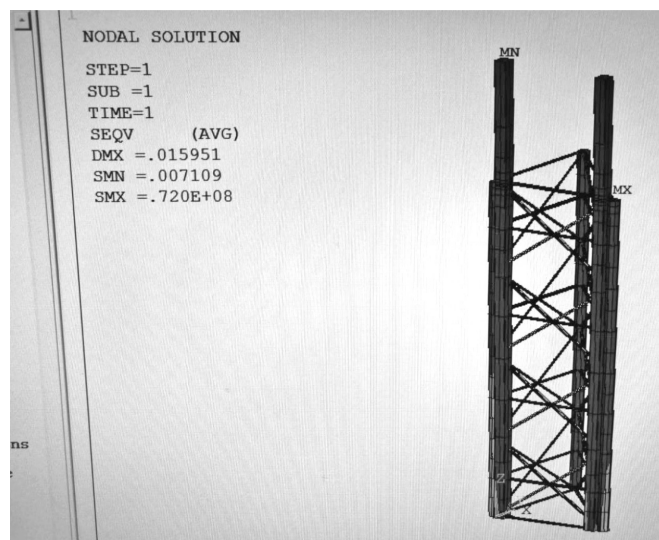


图 4 危险工况下扫描架仿真结果

$0.0445\text{mm}$ , 对测量误差影响很小。从模态分析可知, 整个结构的静刚度和强度满足要求; 整个系统结构薄弱环节在立柱, 其受长度影响, 并且只有一端有支承, 因此自身刚度相对较低。所以, 为了减小扫描架的变形, 将水平基座的刚度设计得极大, 使其尽量不会对测量精度产生影响。但立柱属于移动部件, 且是一端支撑的结构, 不可避免会对测量精度产生影响。扫描架结构变形主要发生在立柱, 所以设计主要考虑立柱的结构方式。因此在扫描架设计时, 必须保证立柱的刚度, 并设法减小自身质量, 使其达到最大比刚度, 并充分兼顾立柱的动态性能, 以保证扫描架的测量精度满足要求。而扫描架移动部分质量和电动机功率的大小, 决定了扫描架发生最危险工况时的撞击力, 因此设计时也需要控制移动部分的质量和电动机的功率, 余量选在合理的范围内。该扫描架已经架设完成, 并通过了验收, 其设计经验对同类型的产品设计有一定的指导作用。

### 参考文献:

- [1] 侯飞. 相控阵雷达天线近场测试系统发展与研制 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [2] 焦洪杰, 张以都, 黎定仕. 大型紧缩场扫描架旋臂结构及动态性能分析 [J]. 北京工商大学学报 (自然科学版), 2007 (6): 19-22.
- [3] 李亚妮. 天线近场测试扫描架动力学分析与优化设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [4] 程亮, 陈林根, 乔山林, 等. 大型天线平面近场测量系统的研制 [J]. 电子机械工程, 2002 (5): 53-55+64.
- [5] 薛正辉, 王楠, 楼世平, 等. 天线时域近场测量技术与实验系统 [J]. 无线电工程, 2009 (4): 34-36+40.
- [6] 董扬. 相控阵雷达天线近场多任务测试系统设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [7] 姜洋, 顾吉丰, 袁新江. 可移动平面近场扫描架的总体结构设计 [C]// 中国电子学会电子机械工程分会 2009 年机械电子学学术会议论文集. 2009: 47-51.

作者简介: 王业文 (1982.02-), 男, 汉族, 湖南益阳人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 天线结构设计。